

0-755058



На правах рукописи

САХТЕРОВ Владимир Иванович

**Исследование распространения радиоволн декаметрового
диапазона на среднеширотной трассе с применением
широкополосных сигналов**

01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2006

Работа выполнена в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской Академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Резников Александр Евгеньевич

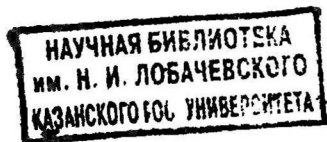
Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Лукин Дмитрий Сергеевич
доктор физико-математических наук Попов Алексей Владимирович

Ведущая организация:

Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А.М. Прохорова Российской Академии наук.

Защита состоится 28 февраля 2006 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.237.01 в ИЗМИРАН по адресу: 142190, Московская обл., г. Троицк (поезд автобусом № 398 от станции метро «Теплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»).



С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан 26 января 2006 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000235821

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.237.01,
доктор физико-математических наук

Михайлов Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последнее десятилетие произошёл качественный скачок в развитии широкополосных систем связи с использованием шумоподобных сигналов.

По определению, широкополосным называется сигнал, имеющий большую базу $B = FT > 1$ (где F – полоса сигнала, T – его длительность) и приблизительно равномерную спектральную плотность в рабочей полосе [1]. Традиционные узкополосные системы связи используют сигналы с базой порядка единицы. Известно, что широкополосные системы более экономичны с точки зрения использования частотного ресурса и отличаются значительно большей устойчивостью при работе в условиях сильных помех. Известно также, что предельная скорость передачи информации определяется шириной занимаемой полосы и равномерностью спектра передаваемого сигнала. Действительно, К. Шеннон, рассматривая возможность безошибочной передачи информации, доказал теорему [2], в соответствии с которой существует такая система кодирования, которая позволяет даже при наличии шумов передавать информацию с конечной скоростью при сколь угодно малой вероятности ошибок, причем скорость передачи определяется соотношением

$$C = W \log_2(1 + P/N),$$

где W – полоса частот, P – мощность сигнала, N – мощность белого шума в данной полосе.

Применение широкополосных систем связи в КВ диапазоне ограничивает сильная дисперсия радиоволн при отражении от ионосферы. Очевидно, что при наличии сильной дисперсии радиоволн при расширении полосы сигнала с какого-то момента необходимо использовать достаточно сложные фильтры, корректирующие дисперсионные искажения сигнала, причем следует предусмотреть возможность изменения параметров этих фильтров с учетом изменения параметров радиоканала вследствие изменчивости ионосферы. В связи с этим возникает во-

прос о предельно допустимой ширине полосы сигнала, при которой использование корректирующих фильтров излишне.

Ряд известных проблем, возникающих в современных узкополосных КВ системах передачи информации, находит свое решение при использовании широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией (ШПСФМ). В таких системах можно добиться разделения различных лучей [1] и избавиться от интерференционных замираний. Одновременно можно решить задачу цифровой режекции узкополосных помех, создаваемых пользователями традиционных систем связи. Кодовое разделение позволяет в одной полосе частот работать многим пользователям ШПСФМ, практически не создавая взаимных помех, пока суммарная спектральная плотность в точке приема существенно не изменит уровень фоновых помех.

Первые широкополосные системы связи появились в КВ диапазоне в конце 50-х годов прошлого столетия, поскольку уже тогда была осознана необходимость более эффективного использования частотного ресурса и обеспечения устойчивой связи. Ввиду того, что в настоящее время КВ радиостанции по-прежнему являются одним из удобных и сравнительно недорогих средств для поддержания связи с труднодоступными районами и подвижными объектами, исследование распространения радиоволн декаметрового диапазона с использованием широкополосных сигналов остается актуальным.

Цель работы

Основной целью работы является исследование возможности использования ионосферного КВ радиоканала для передачи широкополосных сигналов без применения корректирующих фильтров, а также исследование многолучевости. Для достижения этих целей потребовалось решить ряд экспериментальных и теоретических задач:

- 1) разработать методику проведения экспериментов и обработки результатов;

- 2) создать программно-аппаратный комплекс для передачи и приема широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией в КВ диапазоне с изменяемой рабочей полосой от 20 до 200 кГц;
- 3) провести экспериментальные исследования распространения широкополосных КВ радиосигналов на подходящей трассе; выполнить измерения и обработать полученные результаты;
- 4) разработать новые методы синтеза шумоподобных сигналов для использования в широкополосных системах связи и аппаратных комплексах, предназначенных для диагностики радиотрасс и ионосферы с использованием сложных сигналов.

Научная новизна заключается в следующем:

Экспериментально установлено, что допустимое значение ширины рабочей полосы КВ радиосигнала, при которой еще сохраняется уверенный прием без применения корректирующих фильтров, составляет около 150 кГц. Достигнута рекордная разрешающая способность для измерения временных и амплитудных характеристик многолучевого сигнала и проведено их детальное исследование. Показана принципиальная возможность изучения быстрых вариаций параметров радиоканала и ионосферы.

Практическая и научная значимость работы

Экспериментально установлено, что скорость передачи информации по КВ-радиоканалу в зависимости от состояния ионосферы может достигать 9,6 и более килобит в секунду.

Показана принципиальная возможность использования подхода, реализованного в аппаратном комплексе, для изучения быстрых вариаций параметров радиотрассы и ионосферы с характерными временами 10-30 мс.

Новые методы синтеза шумоподобных сигналов позволяют получить сигналы, обеспечивающие высокую скорость передачи информации и устойчивость системы связи по отношению к узкополосным помехам и многолучевости.

Результаты работы легли в основу аппаратных и программных решений при создании серийного радиомодема «Ангара-5М».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Показана возможность расширения рабочей полосы сигнала в декаметровом диапазоне радиоволн до 150 кГц без применения корректирующих фильтров.

2. Разрешающая способность созданного аппаратного комплекса с применением широкополосных сигналов с фазовой модуляцией в 7,5 раз превышает разрешающую способность импульсных ионозондов и в 2,5 раза выше, чем у ионозондов с применением широкополосных сигналов.

3. Показана принципиальная возможность использования подобного подхода с целью исследования с высоким временным разрешением вариаций параметров ионосферного канала связи, а также динамики ионосферы.

4. Разработанные новые эффективные методы синтеза систем сигналов для широкополосных систем связи с прямым расширением спектра позволяют увеличивать скорость передачи данных и обеспечивать скрытность и помехозащищенность.

Личный вклад автора

Все результаты по теме диссертации получены лично автором или при его активном участии. Автор участвовал в постановке задачи по исследованию распространения широкополосных сигналов в КВ диапазоне, исполнял основную работу в создании аппаратного комплекса с применением широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией для исследования многолучевого распространения радиоволн. Принимал непосредственное участие в проведении экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург и в обработке полученных результатов, принимал решения о коррекции методики наблюдений. Автор обнаружил и обратил внимание на возможность исследования быстрых вариаций

амплитудных и фазовых характеристик магнитоионных компонентов с характерными временами порядка 10-30 мс. Автор принимал участие в разработке новых методов синтеза шумоподобных сигналов для широкополосных систем связи и аппаратного комплекса и внедрении полученных результатов в радиомодем «Ангара-5М».

Апробация работы

Основные результаты, включенные в работу, опубликованы в 9 работах и докладывались на Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» в 2003 г. (г. Муром) и на «X региональной конференции по распространению радиоволн» в 2004 г. (г. Санкт-Петербург).

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 115 страницах. Она содержит 80 страниц текста, 26 рисунков, 10 таблиц, одно приложение и библиографию из 72 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВО ВВЕДЕНИИ дан краткий обзор затронутых в диссертации проблем, сформулированы цель и основные задачи диссертации. Дано представление о содержании работы с разделением по главам.

ПЕРВАЯ ГЛАВА представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ по разработанной ранее научной аппаратуре, предназначенной для исследования многолучевого распространения КВ радиоволн и зондирования ионосферы широкополосными сигналами, а также работ о возможности расширения полосы КВ радиоканала. Во введении первой главы кратко рассмотрена история ионосферных наблюдений с начала 20-х годов прошлого столетия. Далее приведен обзор экспериментальных исследований наклонного распространения радиоволн импульсными методами с конца 60-х годов, когда началось подробное изучение многомодовой структуры радиоволн, отраженных от ионосферы. В следующем разделе первой главы рассматривается возможность расширения рабочей полосы частот для средств связи КВ

диапазона. Одной из важнейших проблем, возникающих при попытке расширения полосы сигнала в КВ диапазоне, является необходимость учета дисперсионных эффектов при отражении радиоволн от ионосферы. В работах [3, 4] дисперсионную характеристику ионосферного канала представили в аналитическом виде как состоящую из двух компонент: регулярной дисперсии, обусловленной ионосферными слоями, и нерегулярной дисперсии, обусловленной мелкомасштабными неоднородностями. В работе [3] описана соответствующая модель ионосферного канала полосой 1 МГц, приведены теоретические и экспериментальные результаты по компенсации дисперсионных искажений принимаемого сигнала. Параметры для компенсации выбираются исходя из данных вертикального или наклонного зондирования. Экспериментальные исследования проводились с помощью вертикально-наклонного ионозонда с линейно-частотномодулированным (ЛЧМ) сигналом. Также в первой главе рассматриваются характеристики экспериментальных и промышленных ионозондов, работающих с применением сложных сигналов [5, 6].

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ описывается аппаратный комплекс «Ангара-8И», предназначенный для исследования распространения радиоволн дециметрового диапазона широкополосными сигналами, и изложены полученные с его помощью результаты экспериментов. В разделах 2.2-2.4 приведены характеристики, структура и принцип работы комплекса. Комплекс состоит из передающей установки, расположенной в г. Артемовский Свердловской области, и приёмной установки, расположенной в г. Троицк Московской области. Протяженность трассы составляет около 1500 км.

В разделе 2.5 рассматриваются результаты экспериментов на трассе Москва-Екатеринбург. Первые эксперименты в 1999-2000 гг. проводились на двух фиксированных частотах (6,8 и 8,2 МГц) при ширине полосы от 20 до 600 кГц. Для расширения спектра использовались псевдослучайные последовательности (ПСП) длиной от 32 до 256 элементов.

Таблица 1. Характеристики аппаратного комплекса «Ангара-8И»

1.	Выходная мощность передатчика, Вт	200
2.	Длина ПСП, количество элементов	от 7 до 255
3.	Диапазон рабочих частот, МГц	1.6 – 21.45
4.	Минимальная дискретность частоты, кГц	1
5.	Полоса рабочего сигнала, кГц	20 до 200
6.	Точность привязки по времени, мкс	± 1
7.	Длительность излучения на каждой частоте, с	до 1
8.	Максимальное время непрерывной работы, мин	до 4
9.	Чувствительность приемника, мкВ	10

В ходе экспериментов было выяснено, что оптимальная с точки зрения скорости передачи информации и надежности связи ширина рабочей полосы составляет 150 кГц. Сигнал наблюдался и при более широких полосах, но при этом происходило резкое уменьшение амплитуды принимаемого сигнала. При ширине полосы, равной 300 кГц, ослабление составляло -10...-15 дБ относительно уровня сигнала при полосе 20 кГц, а при полосе 600 кГц – ниже -20 дБ. Скорость передачи информации изменялась в пределах от 300 до 2400 бит/с в зависимости от длины ПСП при ширине рабочей полосы 150 кГц. В экспериментах 2001-2004 гг. упор делался на изучение многолучевости. Многолучевой характер распространения радиоволн наиболее отчетливо виден после согласованной фильтрации сигнала и последующего накопления его амплитуды. Типичный вид сигнала на выходе накопителя при однолучевом и двухлучевом распространении радиоволн приведен на рис. 1. Если характеристики радиоканала стабильны, данный подход позволяет измерять разницу времен распространения различных модов

с точностью порядка длительности одного элемента ПСП, составляющей 13 мкс и соответствующей разности хода около 4 км, что в 2,5...8 раз лучше, чем у известных импульсных и широкополосных ионозондов.

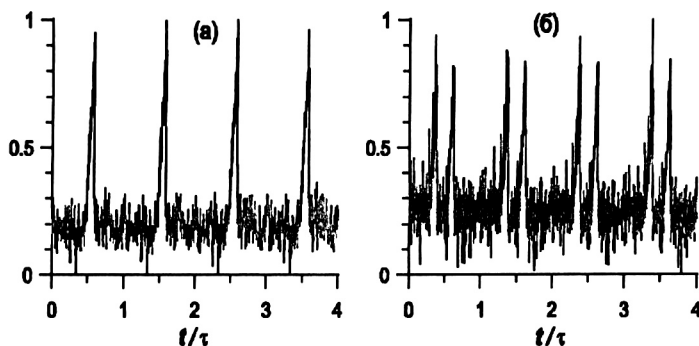


Рис. 1. Нормированная амплитуда сигнала на выходе накопителя при (а) однолучевом и (б) двухлучевом распространении радиоволн

Эксперименты 2003-2004 гг. проводились на модернизированном аппаратном комплексе в автоматическом режиме с 15-минутными интервалами между измерениями и в непрерывном режиме на отдельных частотах. Типичный вид сигнала на выходе накопителя при однолучевом и двухлучевом распространении радиоволн приведен на рис. 1. Результаты прогноза прохождения радиоволн, полученные с помощью программы оперативного и долгосрочного прогноза HfPro, показывают, что наблюдаемые два мода (рис. 1б) соответствуют обыкновенной и необыкновенной волнам, отраженным от слоя F2.

В разделе 2.6 рассмотрены обнаруженные быстрые вариации параметров ионосферного канала. Применение непрерывного сигнала позволяет наблюдать быстрые вариации параметров отдельных модов относительно более стабильных модов. На рис. 2 отчетливо видны вариации разности хода группы модов 1F1 относительно модов E_г и 1F2. Вариации с наибольшей амплитудой имеют место для разности хода

между модами $1F1_x$ и $1F_o^+$, которая колеблется в диапазоне от 4 до 13 км. Вариации между $1F_o^+$ и $1F1_o^-$ значительно меньше, соответствующая разность хода изменяется в пределах от 13 до 17 км. При этом разность хода мода $1F2$ относительно Eg остается практически постоянной.

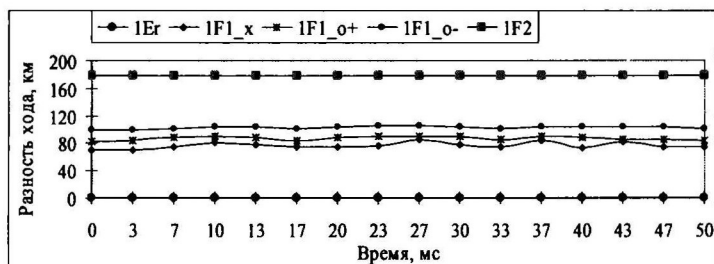


Рис. 2. Вариации разности хода модов $1F1$ относительно модов Eg и $1F2$ по данным наблюдений, проведенных 19 июня 2001 г.

Во многих случаях амплитуда принимаемого сигнала оказывается настолько большой, что позволяет изучать особенности многолучевого распространения без накопителя, что существенно повышает временное разрешение измерений и дает возможность оценки фазовых соотношений между сигналами, пришедшими в точку приема различными путями. На рис. 3 приведены сигналы с выхода накопителя и согласованного фильтра с шестью модами: первый мод $1Eg$, группа модов $1F1$ (необыкновенный, обыкновенный и верхний), мод $1F2$ и мод $2F2$. Далее на рис. 4 приведен график изменения нормированных амплитуд модов Eg , $1F1$, $1F2$ относительно мода $2F2$. Нормированные амплитуды модов $1F2$ и Eg практически постоянны, а значительные вариации наблюдаются для группы модов $1F1$. Если сделать предположение, что амплитуды принимаемых сигналов для модов $2F2$ и $1F1$ практически постоянны на рассматриваемом промежутке времени, можно получить простую оценку для вариаций соответствующих разностей фаз. Наблюдаемое изменение фазы мода $1F1_x$ по отношению к моду $2F2$ со-

ставляет 720° , а для модов $1F1_o^-$ и $1F1_o^+$ – около 360° . Эти данные показывают, что для названных модов длина пути распространения флуктуирует с амплитудой, сопоставимой с длиной волны, которая в данном сеансе составляла 27 м.

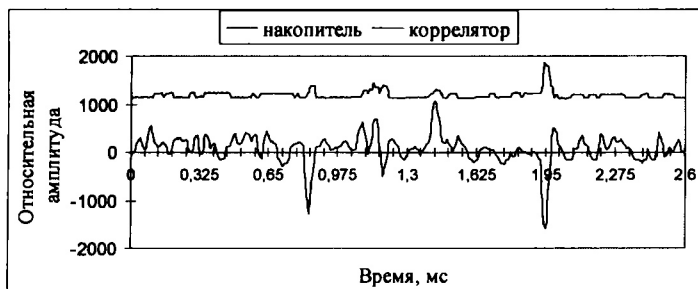


Рис. 3. Фрагмент сигналов с накопителя и коррелятора, 6 модов

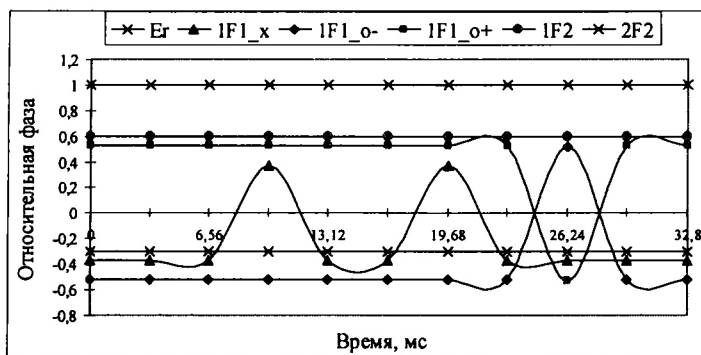


Рис 4. Вариации нормированных амплитуд для различных модов

В ряде сеансов, когда наблюдалась отчетливо выраженная многолучевость, имеются данные измерений на выходе согласованных фильтров для обоих квадратурных каналов, что дает возможность с большей точностью судить о разности фаз между сигналами, приходящими по различным путям. В качестве примера рассмотрим данные, полученные в 06:00 UT 11 июня 2003 г. На частоте 6 МГц наблюдался двухмодовый сигнал с разностью хода между ними порядка 35 км. Ре-

зультаты оперативного прогноза прохождения радиоволн, полученные с помощью программы NfPro, показывают, что наблюдаемые два мода соответствуют обыкновенной и необыкновенной волнам, отраженным от слоя F2 (мод 2F2). На рис. 5 для фрагмента сигнала приведена взаимозависимость разности фаз этих двух модов в зависимости от времени, показывающая наличие вариаций фаз с периодом порядка 10τ , что составляет около 17 мс. Данные вариации фаз являются следствием быстрых изменений параметров ионосферного радиоканала.

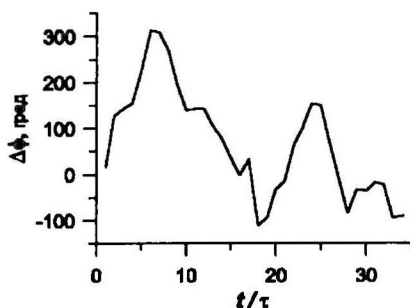


Рис. 5. Вариации разности фаз между двумя сигналами. Время нормируется на длительность τ одной ПСП

В заключение сделан вывод о принципиальной возможности использования подхода, реализованного в аппаратном комплексе «Ангара-8И», с целью исследования быстрых вариаций параметров ионосферного канала связи с характерными временами порядка 10-30 мс. Наблюдаемые вариации параметров радиоканала обусловлены мелко-масштабной неоднородной структурой ионосферы, что открывает возможность исследования тонкой структуры поля волн, прошедших ионосферу, и динамики ионосферных слоев с высоким временным разрешением.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрена широкополосная система связи «Ангара-5М», её характеристики, особенности формирования и обработки сигнала, приводятся результаты трассовых испытаний [7]. «Ан-

гара-5М» представляет собой широкополосный радиомодем с одностотным псевдослучайным сигналом. Несущая частота гетеродина модулируется цифровой кодовой последовательностью с частотой следования импульсов, значительно превышающей ширину полосы информационного сигнала. Используется расширение спектра с помощью взаимно-ортогональных ПСП длиной 32. Ортогональность ПСП, используемых в различных информационных каналах, дает возможность передавать информацию по нескольким каналам одновременно и, таким образом, увеличить скорость передачи информации без изменения ширины занимаемой полосы частот и длины ПСП. В данной радиостанции реализована четырехканальная система передачи.

В разделе 3.2 приведены основные технические характеристики радиомодема и программные возможности управляющей оболочки.

Технические характеристики радиомодема «Ангара-5М»:

Диапазон частот, МГц	1,6 – 21,45
Шаг сетки частот, кГц	1
Вид модуляции	фазовая
Полоса преселектора приемника, –3dB	от 20 до 150 кГц
Длина кода синхроканала	128 элементов
Длина кода информационных каналов	32 элемента
Количество информационных каналов	4
Мощность выходного усилителя, Вт	100
Диапазон режекторных фильтров, dB	40
Скорость передачи одного канала, бит/с	от 300 до 2400
Суммарная скорость передачи, бит/с	от 300 до 9600

В разделе 3.3 представлены структура радиостанции и основные особенности формирования и обработки сигнала. На рис. 6 приведена блок-схема радиостанции. Следует заметить, что большинство узлов выполнено в цифровом виде. Аналоговый видеосигнал с приёмника

оцифровывается 16-разрядным АЦП, в блоке режекторных фильтров (БРФ) производится операция быстрого преобразования Фурье с двойной точностью с целью вычисления спектра сигнала и обнаружения помехи с последующим ее подавлением. С БРФ сигнал поступает на согласованный фильтр (СФ) и блок корреляторов (БК). Сигнал с выхода СФ дополнительно обрабатывается в накопителе, там же производится операция обнаружения сигнала и формирование синхроимпульсов для БК. Сигналы, полученные с БК, обрабатываются согласно протоколу соответствующего уровня и поступают в персональный компьютер (ПК).

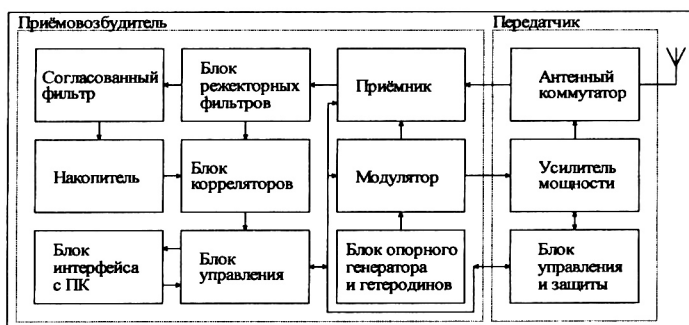


Рис. 6. Блок-схема радиостанции «Ангара-5М»

В режиме передачи информация с ПК, после её обработки в соответствии с протоколом обмена, кодируется, модулируется по закону ПСП с последующей ВЧ модуляцией и поступает на усилитель мощности.

В разделе 3.4 приводятся результаты трассовых испытаний, проведенных с августа 2003 г. по апрель 2004 г. В качестве примера на рис. 7 показаны значения прогнозируемой напряженности поля, полученные с помощью программы оперативного и долгосрочного прогноза HfPro, и усредненные значения скорости обмена информацией между радиостанциями в декабре 2003 г. Согласно результатам долгосрочного про-

гноза максимальная скорость обмена достигала 9,6 кбит/с, средняя скорость составляла 4,8 кбит/с. Из графика можно увидеть корреляцию прогнозируемой напряженности поля с эффективной скоростью передачи. Отчетливо видна динамика роста скорости передачи с ростом напряженности. Наблюдаемое иногда запаздывание изменения скорости передачи не превышает 15-30 мин., что сопоставимо с временным интервалом между двумя измерениями.



Рис. 7. Усредненные значения скорости обмена и прогнозируемой напряженности поля в декабре 2003 г.

Проведено сопоставление результатов трассовых испытаний с геомагнитной активностью. При среднем уровне геомагнитной активности качество связи уменьшается незначительно, при высоком уровне возмущенности скорость передачи резко снижается, но связь не пропадает полностью.

Проведенные эксперименты доказали возможность расширения полосы сигнала в дециметровом диапазоне радиоволн до 150 кГц без применения корректирующих фильтров. На трассе Москва–Екатеринбург протяженностью около 1500 км достигнута скорость передачи информации 9600 бит/с, что значительно превышает возможности узкополосных радиостанций.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ изложены разработанные новые методы синтеза шумоподобных сигналов для широкополосных систем связи и примеры использования этих методов с целью синтеза системы сигналов для радиомодема «Ангара-5М».

Для реализации преимуществ широкополосных систем связи необходимо выбрать оптимальную или близкую к ней систему сложных сигналов. В ШПСФМ используются фазоманипулированные сигналы, сформированные с помощью ПСП. В этой области одной из фундаментальных проблем является создание универсальных и эффективных алгоритмов синтеза ансамблей ПСП, обладающих хорошими корреляционными свойствами [1]. Данная задача сводится к поиску глобального экстремума некоторой целевой функции, заданной на дискретном множестве элементов конфигурационного пространства, причем число этих элементов настолько велико, что решение методом перебора оказывается практически неосуществимым. Если не накладывать никаких ограничений на длину ПСП и их число в ансамбле, то перебор различных вариантов остается единственным способом решения поставленной задачи, и возникает вопрос о выборе подходящей стратегии перебора. Поскольку найти оптимальное решение невозможно, ограничиваются квазиоптимальными решениями, соответствующими достаточно глубоким локальным минимумам целевой функции. В работах [8-11] было предложено использовать метод отжига и генетические методы для решения задачи синтеза как отдельных ПСП, так и их ансамблей, и было показано, что данный подход действительно позволяет создать универсальные и достаточно эффективные алгоритмы.

В разделе 4.1 рассмотрен метод отжига [8, 11], который обладает достаточной эффективностью для синтеза отдельных ПСП сравнительно небольших длин. После определенной модификации он может также использоваться для синтеза ансамблей ПСП, но не в общем случае, а при выборе ПСП из известного множества последовательностей с хорошими свойствами периодических корреляционных функций, например, из множества последовательностей Голда [11].

В разделе 4.2 рассмотрены генетические алгоритмы синтеза широкополосных сигналов [9-11]. Изначально генетические алгоритмы предназначались для решения разнообразных задач комбинаторной оптимизации. Основные идеи данного метода восходят к теории эволюции Дарвина и молекулярно-биологическим основам этой теории, ключевыми понятиями которых являются наследственность, изменчивость и отбор. Строгое определение генетического алгоритма, по-видимому, впервые было введено Дж. Холландом [12]. В настоящее время эти алгоритмы нашли широкое применение в самых разнообразных задачах комбинаторной оптимизации. Данная глава содержит описание модификаций генетических алгоритмов, предназначенных для синтеза отдельных сигналов и их систем.

В разделе 4.3 описывается синтез системы сигналов для КВ радиомодема «Ангара-5М». Синтез этих сигналов осуществлялся в 2 этапа. На первом этапе синтезировались сигналы информационных каналов, а на втором – формировался сигнал для канала синхронизации.

Сначала формируется система сигналов Стиффлера, которая получается поэлементным перемножением столбцов матрицы Адамара размером 32×32 с некоторой псевдослучайной бинарной последовательностью длиной 32, состоящей из +1 и -1, которую будем называть порождающей. Задача данного этапа состоит в том, чтобы найти такую порождающую последовательность, при которой из соответствующего множества 32-х сигналов Стиффлера можно было выбрать четыре сигнала с хорошими характеристиками. Число сигналов, принимаемых в расчет при оптимизации, выбиралось из тех соображений, что чаще всего будет использоваться относительная двухпозиционная модуляция, причем передача будет вестись по 1–4 каналам одновременно.

При синтезе сигналов ставилась задача не только минимизировать амплитуду выбросов корреляционных функций четырех наилучших сигналов, но и сгладить их спектры. Оптимизация проводилась с использованием генетического алгоритма. По окончании процедуры оп-

тимизации система из четырех наилучших сигналов дополнялась еще четырьмя, выбранными по спектральным характеристикам.

После того, как были отобраны 8 наилучших сигналов для использования в информационных каналах, из оставшихся 24-х формировались сигналы канала синхронизации, состоящие из 64 и 128 элементов. Синтез осуществлялся путем перебора всевозможных комбинаций. Отбирались несколько сигналов с наиболее равномерным спектром, а из полученного множества затем «вручную» отбирались сигналы, у которых не только спектры, но и корреляционные свойства были удовлетворительны.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

- с помощью разработанного аппаратного комплекса исследованы характеристики многолучевых радиосигналов на среднеширотной трассе Москва-Екатеринбург;
- показана принципиальная возможность использования подобного подхода с целью исследования с высоким временным разрешением вариаций параметров ионосферного канала связи, а также динамики ионосферы;
- экспериментально доказана возможность расширения рабочей полосы сигнала до 150 кГц без использования корректирующих фильтров и возможность повышения скорости передачи информации до 9,6 кбит/с и выше;
- разработаны новые эффективные методы синтеза систем сигналов для широкополосных систем связи с прямым расширением спектра, позволяющие увеличивать скорость передачи данных и обеспечивать скрытность и помехозащищенность.

Список работ, в которых опубликованы основные
результаты диссертации:

1. Копейкин В.В., Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Пудиков М.В., **Сахтеров В.И.** Синтез фазоманипулированных сигналов методом отжига // Препринт №3(1131). – М.: ИЗМИРАН, 2000 г. – 10 с.
2. Волкомирская Л.Б., Копейкин В.В., Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Морозов П.А., Резников А.Е., **Сахтеров В.И.**, Старостин С.В. Генетический метод синтеза шумоподобных фазоманипулированных сигналов / Препринт №8(1136). – М.: ИЗМИРАН, 2000 г. – 19 с.
3. Лобзин В.В., **Сахтеров В.И.**, Копейкин В.В., Лобзина А.Н., Аннакулиев С.К., Волкомирская Л.Б., Морозов П.А., Старостин С.В., Резников А.Е. Генетический метод синтеза шумоподобных фазоманипулированных сигналов и их ансамблей // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46. – №2. – С. 194-200.
4. **Сахтеров В.И.**, Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е. Коротковолновая широкополосная система связи «Ангара-5М»/Препринт №3(1146).– М.: ИЗМИРАН, 2002 г. – 14 с.
5. **Сахтеров В.И.**, Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Швец Д.П. Коротковолновая широкополосная радиостанция «АНГАРА-5М» // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47. – №9. – С. 1149-1152.
6. Лобзин В.В., Лобзина А.Н., **Сахтеров В.И.**, Волкомирская Л.Б., Резников А.Е. Современные методы комбинаторной оптимизации в задачах синтеза сложных фазоманипулированных сигналов для широкополосных систем связи // Сборник докладов Всероссийской научной конференции: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003. – С. 131-135.
7. **Сахтеров В.И.**, Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е., Железняков В.И., Швец Д.П. Цифровая коротковолновая широкополосная радиостанция "Ангара-5М" //

Сборник докладов Всероссийской научной конференции: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд. полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003. – С. 451-454.

8. Сахтеров В.И., Лобзин В.В., Писарев Р.В., Волкомирская Л.Б. Аппаратурный комплекс для исследования многолучевого характера распространения декаметровых радиоволн и результаты первых экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург // Тезисы докладов. X региональная конференция по распространению радиоволн. – Санкт-Петербург: НИИ Химии СПбГУ, 2004 г. – С. 50.

9. Сахтеров В.И., Лобзин В.В., Крашенинников И.В., Писарев Р.В., Лобзина А.Н., Волкомирская Л.Б. Аппаратный комплекс для исследования многолучевого характера распространения декаметровых радиоволн и результаты экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург // Препринт №2(1163). – М.: ИЗМИРАН, 2006 г. – 23 с.

Литература, цитируемая в тексте:

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

2. Шеннон К. Связь при наличии шума / В кн.: К. Шеннон: Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ./ Под ред. Р.Л. Добрушина, О.Б. Лупанова. – М.: ИЛ. 1963. – С. 433-460.

3. Иванов В.А., Иванов Д.В. Коррекция широкополосных коротковолновых ионосферных радиоканалов.//Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – №6. – С. 688-697.

4. Иванов В.А., Иванов Д.В., Колчев А.А. Исследование особенностей дисперсионных характеристик радиоканалов с помощью ЛЧМ-ионозонда //Изв. Вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – №3. – С. 241-254.

5. Намазов С.А., Рыжкина Т.Е. Исследование сложного сигнала при ионосферном распространении декаметровых волн /Из сб.: Распространение радиоволн. – М.: Наука, 1975. – С. 262.

6. Reinisch, B. W., et al., The Digisonde 256 Ionospheric Sounder World Ionosphere/ Thermosphere Study, *WITS Handbook*/ Ed. by C. H. Liu. – December 1989. – Vol. 2.

7. Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Швец Д.П. Коротковолновая широкополосная радиостанция «Ангара-5М» // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т.47. – №9. – С. 1149-1152.

8. Копейкин В.В., Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Пудиков М.В., Сахтеров В.И. Синтез фазоманипулированных сигналов методом отжига / Препринт №3(1131). – М.: ИЗМИРАН, 2000. – 10 с.

9. Волкомирская Л.Б., Копейкин В.В., Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Морозов П.А., Резников А.Е., Сахтеров В.И., Старостин С.В. Генетический метод синтеза шумоподобных фазоманипулированных сигналов / Препринт № 8(1136). – М.: ИЗМИРАН, 2000. – 19 с.

10. Лобзин В.В., Сахтеров В.И., Копейкин В.В., Лобзина А.Н., Аннаулиев С.К., Волкомирская Л.Б., Морозов П.А., Старостин С.В., Резников А.Е. Генетический метод синтеза шумоподобных фазоманипулированных сигналов и их ансамблей // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46. – № 2. – С. 194-200.

11. Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Сахтеров В.И., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е. Современные методы комбинаторной оптимизации в задачах синтеза сложных фазоманипулированных сигналов для широкополосных систем связи // Сборник докладов Всероссийской научной конференции: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003. – 546с. – С. 131-135.

12. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. – Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 1975.

В.И. Сахтеров

**Исследование распространения радиоволн декаметрового диапазона на
среднеширотной трассе с применением широкополосных сигналов**

Подписано к печати 17.01.2006 г.

Усл. печ.л.1,0. Бесплатно. Заказ 3

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИЗМИРАН

142190, г. Троицк Московской области

